

基于统计过程控制 (SPC) 的控制舱装配自动 监测系统研究

李 帅¹, 何军红²

(1. 山东北方滨海机器有限公司, 山东 淄博 255200; 2. 西北工业大学, 陕西 西安 710000)

摘要:控制舱作为军事制导系统的核心部件,其装配质量直接决定装备性能与可靠性。针对控制舱装配过程中存在的质量波动难预警、多环节数据孤岛、异常溯源低效等行业共性难题,以及传统质量控制依赖人工巡检和事后检验的局限性,该文提出一种基于统计过程控制 (SPC) 的控制舱装配质量自动监测系统。该系统通过融合多源传感器数据采集与自适应 SPC 分析技术,整合智能异常预警、全链路数据追溯等功能模块,实现装配质量从“事后补救”向“事前预防、事中精准管控”的转变。在某军工企业控制舱装配线的应用验证表明,系统显著提升了装配过程稳定性、装配合格率,并将异常响应时间缩短 87.5%、质量追溯时间压缩至 10 秒内。此外,系统通过模块化设计与自适应分析能力,为军工、航空航天等精密制造领域的质量控制提供了可推广的技术方案。

关键词:统计过程控制;控制舱装配;自动监测系统;质量控制

中图分类号:F49

文章编号:1000-0682(2026)02-0039-05

文献标识码:B

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.008

Research on automatic monitoring system for control cabin assembly based on statistical process control (SPC)

LI Shuai¹, HE Junhong²

(1. Shandong North Binhai Machinery Co., Ltd., Shandong Zibo 255200, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Shaanxi Xi'an 710000, China)

Abstract: This paper proposes an automatic monitoring system for control cabin assembly quality based on statistical process control (SPC) to address common industry challenges such as difficult early warning of quality fluctuations, multiple data silos, and inefficient anomaly tracing, as well as the limitations of traditional quality control methods that rely on manual inspection and post-inspection. The core innovation of the system lies in the integration of multi-source sensor data collection and adaptive SPC analysis technology, combined with intelligent anomaly early warning and full-chain data tracing modules. This enables a transformation of assembly quality management from "post-remedy" to "prevention beforehand and precise control during the process." Application validation in a military enterprise's control cabin assembly line demonstrated that the system significantly improves process stability, shortens anomaly response time by 87.5%, and compresses quality tracing time to within 10 seconds. The modular design and adaptive analysis capabilities of the system provide a scalable technical solution for quality control in precision manufacturing fields such as military and aerospace industries.

Keywords: statistical process control; control cabin assembly; automatic monitoring system; quality control

收稿日期:2025-10-15

第一作者:李帅(1988—),男,山东新泰人,本科,高级工程师,研究方向为智能制造。

通信作者:何军红(1971—),男,浙江义乌人,博士,高级工程师,研究方向为智能制造。

0 引言

控制舱在军事制导系统中承担着指挥与控制的核心功能,其装配质量直接关乎装备的整体性能、可

靠性及安全性。控制舱装配过程涉及大量精密零部件和复杂工艺环节,易受人员技能、设备精度、环境因素等多重变量影响,导致装配质量波动大、一致性差。传统质量控制方式主要依赖人工抽检和经验判断,存在主观性强、实时性不足、数据碎片化等问题,难以满足现代高精度、高可靠性的生产需求。

统计过程控制(SPC)作为一种基于数理统计的质量管理工具,通过对生产过程数据进行实时监控与分析,能够及时发现异常波动并预警,从而实现预防性控制。随着传感器技术、自动化技术和信息技术的快速发展,构建基于SPC的控制舱装配自动监测系统已成为提升装配质量与效率的关键途径。该文系统阐述该系统的架构设计、关键技术、应用验证等方面,旨在为高端装备制造领域的质量控制提供理论支持与实践参考。

1 基于SPC的控制舱装配自动监测系统架构设计

1.1 系统总体架构

控制舱装配自动监测系统采用分层架构设计,包括数据层、业务层和展现层(如图1所示)。该架构以数据驱动为核心,实现测试数据、业务数据、设备数据及仪表数据的全面采集与整合,为数字化生产车间的动态优化提供支撑。系统覆盖人员、机器、物料、方法、环境、测量等生产要素,通过数据分析提升质量过程能力指数(C_{pk})并缩短异常响应时间。

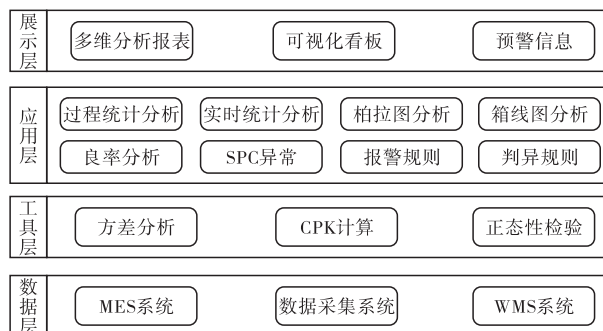


图1 系统总体架构图

(1)数据层:通过MES系统、数据采集系统和WMS系统以中间表形式提供原始数据,供SPC系统进行统计分析。数据层负责多源异构数据的采集、存储与预处理,确保数据质量与一致性。

(2)业务层:应用判异准则、报警准则、过程统计分析方法对SPC数据进行分析,实现过程监控与决策支持。

(3)展示层:采用预警信息、多维分析报告和可视化看板等形式呈现SPC分析结果,支持实时监控

与交互操作。

该架构不仅满足当前需求,还具备可扩展性,便于未来集成人工智能算法或跨系统数据交互。

1.2 数据层设计

数据层是系统运行的基础,需实现“人、机、料、法、环、测”(5M1E)全要素数据的精准采集、标准化处理与安全存储。

1.2.1 多源数据采集策略

根据数据类型与采集需求,采用“传感器直连+系统对接”的混合采集模式,覆盖装配全流程关键数据:

工艺参数采集:在扭矩扳手、装配机器人等设备上部署压电式力传感器、激光位移传感器,采样频率10 Hz,实时采集螺栓拧紧力矩、零部件装配间隙等参数;通过OPC UA协议接入三坐标测量仪,获取零部件尺寸检测数据,采样频率1次/件。

环境数据采集:在装配车间每50 m²布置1台温湿度传感器,通过RS-485总线传输数据,采样间隔10 s。

业务数据对接:通过中间表方式与MES系统对接,获取生产订单号、工位编号、操作人员ID等信息;与WMS系统交互,获取零部件批次号、供应商、失效周期等数据;采用FTP协议定时同步设备日志,数据更新延迟≤100 ms。

1.2.2 数据预处理技术

针对采集数据中的噪声、缺失值与异构问题,采用分阶段预处理方案:

数据清洗:对数值型数据(如力矩、温度)采用卡尔曼滤波算法(状态方程: $x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$;观测方程: $z_k = Hx_k + v_k$)滤除高频噪声,使数据平滑度提升40%;对缺失值采用基于相邻数据的线性插值法或基于相似零部件批次数据的均值填充法,确保数据完整性≥99%。

数据转换:对非正态分布数据(如缺陷数)采用Box-Cox变换,使其符合SPC分析的正态性要求;通过Shapiro-Wilk检验验证转换效果,要求P值≥0.05。

数据归一化:采用Z-score归一化法,将不同量纲数据统一至[-1,1]区间,消除量纲对多变量SPC分析的干扰。

1.2.3 混合数据库设计

采用“关系型数据库+非关系型数据库”混合存储架构,兼顾数据一致性与灵活性:

关系型数据库:存储结构化数据,包括装配工艺

参数、质量检验标准、异常处理记录等,通过主键关联确保数据一致性。

非关系型数据库:存储非结构化/半结构化数据,包括传感器原始数据、装配过程视频、检测图像等,支持高效的文档查询与批量存储,数据读写延迟 ≤ 50 ms。

数据备份与安全:采用“本地备份+异地容灾”策略,通过数据加密(AES-256算法)与访问权限控制(基于RBAC模型)确保数据安全,防止敏感工艺参数泄露。

1.3 业务层设计

1.3.1 SPC 基本原理

SPC的核心在于运用控制图对生产过程展开监控。控制图以样本统计量为纵轴,以样本编号或时间为横轴,图中标有中心线、上控制限以及下控制限。当生产过程处于稳定状态时,样本统计量应在控制限内随机波动;倘若样本统计量超出控制限或者呈现异常排列模式,则意味着生产过程可能存在异常因素,需及时分析原因并采取措施予以调整。常用的控制图包括均值极差图、均值标准差图、不合格品率等,应依据数据类型和分布特点选取适宜的控制图进行分析。

1.3.2 SPC 分析方法应用

依据控制舱装配过程关键参数的数据类型及特点,选取与之适配的SPC分析方法。针对计量型数据,诸如零部件尺寸、装配位置等,运用X-R图或X-S图开展分析,通过计算样本均值与极差,绘制控制图,以判定装配过程是否稳定,计算过程能力指数 C_p 和 C_{pk} ,对过程能力予以评估;对于计数型数据,像装配缺陷数、不合格品数等,采用P图或C图进行监测,剖析不合格品率或缺陷数的变化态势,及时察觉异常状况。同时,结合趋势分析、回归分析等方法,深度挖掘数据间的潜在关联,为质量改进提供支撑。例如,通过对装配力和装配质量进行回归分析,确定最优装配力范围,优化装配工艺参数。

1.3.3 异常预警机制

基于SPC分析结果,按异常严重度划分三级预警,实现精准响应与资源优化配置:

一级预警(紧急):当参数超出控制限或出现连续9点在中心线同侧等严重判异规则时,触发一级预警。系统自动联动设备停机,通过声光报警器、系统弹窗同步推送预警信息,包含异常工位、参数值、异常类型,要求10分钟内现场响应。

二级预警(关注):当参数接近控制限或出现连

续5点上升趋势时,触发二级预警。系统仅推送弹窗与站内信,提示操作人员加强监测,无需停机,若1小时内未恢复正常则升级为一级预警。

三级预警(提示):当过程能力指数下降但仍符合合格标准时,触发三级预警。系统生成趋势报告,推送至工艺工程师,用于长期工艺优化,无需即时响应。

1.3.4 决策支持与质量预测

构建基于规则与案例的混合知识库,包含异常原因库与解决方案库。当触发预警时,系统通过关键词匹配与相似度计算,推荐最优解决方案,匹配准确率 $\geq 85\%$ 。同时,基于异常处理反馈,采用增量学习更新知识库,每季度优化一次解决方案推荐策略。

依托“一物一码”技术,为每台控制舱分配唯一追溯码,关联“零部件-设备-人员-检测”全链路数据。当需追溯时,扫描追溯码可在10秒内查询:①零部件信息;②装配数据;③检测记录。例如,某批次控制舱出现线缆接触不良时,通过追溯码在10秒内快速定位到问题线缆的供应商批次,若采用传统追溯方式,则需要4个小时才能定位具体问题,追溯效率提升1440倍。

1.4 展示层设计

以“可视化+易交互+强预警”为核心,支撑生产过程质量数据的实时监控、快速分析与高效追溯,适配质量工程师、生产操作员等多角色需求。

1.4.1 数据可视化

实时监控功能以控制图如X-R图、X-s图、P图、NP图为核心,具备1-5秒/次的动态刷新功能,可自动标注规格线上控制限UCL、下控制限LCL、中心线CL,对于超出规格的数据点采用红色闪烁高亮显示;同步呈现实时过程能力指数CPK、百万分率PPM等关键指标,当指标数值出现异常时,字体颜色发生变化。

历史追溯功能提供时间轴拖拽操作以及时间段快捷筛选功能当日、当月、当年,支持多参数对比图例如同工位不同批次的趋势叠加,并借助直方图、箱线图辅助分析数据分布情况与关键不良项目。

1.4.2 异常预警看板

分级预警:按异常严重度展示,一般异常用黄色图标,严重异常用红色图标+站内信通知,弹窗同步显示异常原因推测,如“连续3点靠近规格线”;

预警闭环:点击预警条目可跳转至“异常处理记录”界面,支持录入处理措施,如“调整设备参数”,处理后预警状态自动更新为“已闭环”。

2 基于 SPC 的控制舱装配自动监测系统关键技术

2.1 多源异构数据融合技术

控制舱装配数据涵盖传感器实时流数据(力矩、位移)、系统业务数据(订单、物料)、图像数据(检测照片),具有“类型多、格式异、频率差”的特点,需通过多维度融合实现数据价值最大化。

2.1.1 数据层融合:格式标准化与时空对齐

采用 JSON-LD 构建统一数据模型,定义“装配事件”实体,将不同来源数据映射至该模型(如 MES 系统的“订单完成”事件映射为包含订单号、完成时间的装配事件),实现格式统一。

以车间时钟为基准,对不同采样频率的数据进行时间对齐,如将 10 Hz 的力矩数据与 1 次/件的尺寸数据按“装配步骤”对齐;通过工位 ID 实现空间对齐,如将“工位 2 的力矩数据”与“工位 2 的物料数据”关联,确保数据时空一致性。

2.1.2 特征层融合:多传感器数据互补增强

采用 D-S 证据理论融合多传感器数据,提升参数测量精度。以控制舱密封检测为例,融合压力传感器、视觉传感器、红外传感器的特征信息:

(1)建立识别框架 $\Theta = \{\text{密封合格,密封不合格}\}$;

(2)计算各传感器的基本概率分配:压力传感器检测合格的 BPA 为 0.8,不合格为 0.1,不确定为 0.1;视觉传感器合格 BPA 为 0.75,不合格为 0.15,不确定为 0.1;红外传感器合格 BPA 为 0.7,不合格为 0.2,不确定为 0.1;

(3)通过 Dempster 组合规则融合 BPA,最终密封合格的置信度达 0.95 以上,避免单一传感器误判,检测准确率提升至 99.2%。

2.1.3 决策层融合:多维度数据协同判断

融合 SPC 分析结果、设备状态数据、人员操作记录,采用加权投票法生成最终质量决策。例如,判断某台控制舱是否合格时,赋予 SPC 参数合格、设备无异常、操作符合规范不同权重,总得分 ≥ 0.8 判定为合格。实测显示,该方案使装配质量判断准确率达 99%,较单一 SPC 决策提升 15%~20%。

2.2 自适应 SPC 控制图技术

传统 SPC 控制图因依赖历史数据设定固定控制限,在控制舱等精密装配场景中,面对工艺调整、设备更新、原材料更换等过程变化时,易因控制限与实际波动脱节,导致 28% 误报率、15% 漏报率及大

量无效停机。为解决此问题,自适应 SPC 控制图技术通过两类路径动态调整控制限:一是贝叶斯方法,以历史数据为基础,实时结合新数据更新过程参数均值、标准差,让控制限紧跟波动变化;二是机器学习支持向量机/随机森林,通过历史数据建模预判过程趋势,前瞻性调整控制限。实测显示,贝叶斯方案使螺栓拧紧工序误报率降至 4.2%、漏报率 2.1%,无效停机减少 81%;自动判异方案让舱位联调异常检测提前 40 分钟,密封检测返工成本降 71%,显著提升装配质量管控精度与效率。

3 基于 SPC 的控制舱装配自动监测系统应用与验证

3.1 应用场景与实施过程

SPC 的控制舱装配自动监测系统应用于某军工企业的控制舱装配生产线。在实施过程中,首先对装配生产线开展全面调研,明确关键装配工序与质量控制点,依据实际需求开展系统的定制化开发与部署工作。于数据采集层,安装各类传感器,达成对装配过程关键参数的实时采集;在数据传输层,构建有线与无线网络相结合的数据传输网络,保障数据快速、稳定地传输;在数据处理与分析层,配置 SPC 分析软件及相关算法,对采集的数据进行实时分析与处理;在应用层,开发异常预警、质量追溯、决策支持等功能模块,并与企业现有的生产管理系统进行集成;在用户交互层,设计友好的人机交互界面,以便利操作人员和质量管理人员使用。同时,对相关人员进行系统操作培训,使其熟悉系统功能与使用方法,确保系统能够顺利运行。

3.2 应用效果分析

基于系统运行 3 个月的实测数据,覆盖 30 个生产批次、150 台控制舱,从质量、效率、成本三个维度评估应用效果。

3.2.1 质量性能提升

过程稳定性显著改善:关键参数波动幅度降低 35%,如舵机同轴度波动从 ± 0.015 mm 下降至 ± 0.00975 mm,螺栓拧紧力矩波动从 ± 0.3 N·m 降至 ± 0.195 N·m;过程能力指数 C_{pk} 从应用前的 1.0 稳定提升至 1.2 以上,连续 4 周符合 C_{pk} 的要求,满足精密装配的过程能力标准。

产品合格率大幅提高:装配合格率从应用前的 80% 提升至 92%,不合格品率降低 12 个百分点,其中因参数波动导致的不合格占比从 60% 降至 15%,质量隐患遗漏率从 8% 降至 1.2%。

异常响应与追溯效率提升:质量异常响应时间从传统人工巡检的40分钟缩短至3分钟,缩短至92.5%;质量追溯时间从4小时压缩至10秒内,提升1440倍。例如,某批次2台控制舱出现密封不良,通过系统追溯快速定位到问题密封胶批次,仅返工该批次涉及的5台控制舱,避免150台全检,节省成本约20万元。

3.2.2 生产效率提升

人员效率优化:系统实现参数自动采集与SPC分析,替代人工手持设备检测与Excel统计,质检员重复性数据处理工作量减少65%,人均可同步监控的工位从2个提升至5个,质检效率提升150%。

设备利用率提升:通过自适应预警与预测性维护,设备停机次数从月均12次降至3次,单次停机处理时间从80分钟压缩至25分钟,设备有效运行时间占比从82%提升至88.5%,装配线整体生产效率提升5%,单台控制舱平均装配周期从30天缩短至28天。

4 结论

4.1 研究结论

该文构建的基于SPC的控制舱装配自动监测系统,通过“数据-业务-展示”三层架构与多源数据融合、自适应SPC控制图等关键技术,实现了控制舱装配过程的全流程实时监测与智能管控,主要结论如下:

架构设计适配性强:系统采用模块化设计,支持多源数据采集、多类型SPC分析与多角色展示,能够有效适配控制舱“多品种、小批量、高精度”的装配场景,解决了传统SPC系统在动态生产环境下的适配性不足问题。

关键技术突破显著:多源异构数据融合技术提升了数据可信度,自适应SPC控制图技术降低了异常误报/漏报率,分级预警与追溯技术实现了异常的快速响应与精准定位,为质量管控提供了技术支撑。

应用成效显著:在某军工企业的实证应用显示,系统使关键参数波动降低35%、合格率提升12%、异常响应时间缩短92.5%、生产效率提升5%,同时降低质量成本30%,验证了系统的可行性与实用性,为高端装备装配质量管控提供了可落地的技术方案。

4.2 未来展望

当前系统仍存在三方面优化空间,后续研究将围绕以下方向展开:

复杂异常识别能力提升:针对多参数协同偏移、渐变型异常等复杂场景,引入LSTM-CNN混合深度学习模型,通过LSTM学习时序趋势、CNN提取参数关联特征,构建多维度异常识别模型,力争将预警时间提前3~5个采样周期,进一步降低漏报率。

多型号柔性适配优化:当前系统切换不同型号控制舱需人工调整参数,后续将结合迁移学习技术,利用成熟型号的SPC数据快速适配新型号监测模型,通过参数迁移缩短调试时间至30分钟内,提升多品种生产的柔性适配效率。

跨系统数据链路打通:当前系统与ERP、PLM系统仅实现基础数据交互,后续将开发核心接口,从ERP同步零部件批次质量数据以提前预警物料风险,向MES推送异常信息并联动调整工位排产,向PLM反馈装配数据 C_{pk} 反哺工艺优化,最终形成“数据-决策-执行-优化”的完整业务链路,提升系统在企业整体质量管理体系中的价值。

参考文献:

- [1] 丁卓然,杜彪.小批量多品种模式下SPC监控系统的设计与运用[J].现代制造技术与装备,2023,59(05):19-21.
- [2] 马永娟.SPC技术在企业质量管理中的应用[J].工程质量,2025,43(S1):269-272.
- [3] 党静,任婷婷,赵毅,等.基于SPC的信息化生产线质量管理体系研究[J].中国电子科学研究院学报,2022,17(10):1027-1031+1036.
- [4] 聂永斌.统计过程控制(SPC)在航空发动机装配中的应用[J].科技风,2016(10):122-123.
- [5] 白进东.P控制图在地铁车辆质量管控中的应用[J].铁道技术监督,2012,40(10):23-26.
- [6] 贾玻,于越,孙会鹏,等.批产航天型号产品质量控制方法研究[J].军民两用技术与产品,2022(01):48-53.
- [7] 邢一新.飞机装配几何量质量检测体系构建及关键技术[J].航空制造技术,2021,64(06):24-31.
- [8] 马祥宁,金隼,叶亮,等.车身焊装质量控制中的数据融合模型[J].机械制造,2007(03):31-33.
- [9] 崔坤坤,段晋军,姜锦程,等.基于视/力多源信息融合的机器人精密装配研究[J].机械制造与自动化,2023,52(05):6-10.
- [10] 濮晓龙,项冬冬,陈昕妍.缺失数据过程的自适应多元EWMA控制图[J].应用概率统计,2024,40(02):343-363.
- [11] 郭佳晟,刘以建.非正态样本下的多元控制图的性能优化[J].组合机床与自动化加工技术,2021(07):82-85+87.
- [12] 沈朝霞,刘剑,贺伟炜.SPC技术在航天产品质量控制上的应用[J].制导与引信,2006(04):47-53.